

---

---

# ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

Научная статья

УДК: 504.3.054; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-174-189

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА И МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СВОДНЫХ РАСЧЕТОВ И КВОТИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ

**Оводков Михаил Владимирович.**

**Всероссийский научно-исследовательский институт «Экология», Москва, Россия;**

**МИРЭА – Российский технологический университет**

**(Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва, Россия.**

**Петров Вадим Олегович;**

**Ткачев Максим Александрович;**

**✉ Азаров Валерий Николаевич.**

**Всероссийский научно-исследовательский институт «Экология», Москва, Россия**

**✉ [azarovpubl@mail.ru](mailto:azarovpubl@mail.ru)**

*Аннотация.* Описаны предпосылки к разработке единообразного методического подхода к определению контрольных точек для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха и дальнейшего квотирования выбросов. Представлена блок-схема методики определения количества и местоположения контрольных точек, а также результаты ее применения на территориях 29 пилотных городов – участников федерального проекта «Чистый воздух» и эксперимента по квотированию выбросов. В качестве способов оценки репрезентативности количества контрольных точек представлены статистические методы обработки данных. Представлены результаты проведенной Всероссийским научно-исследовательским институтом «Экология» работы по определению контрольных точек в 29 пилотных городах. Обозначены направления дальнейшего развития методики с учетом функционала методов сетевого анализа и теории графов.

*Ключевые слова:* атмосферный воздух, выбросы, загрязняющие вещества, контрольные точки, сводные расчеты загрязнения атмосферы, квотирование выбросов

**Для цитирования:** Оводков М.В., Петров В.О., Ткачев М.А., Азаров В.Н. Методический подход к определению количества и местоположения контрольных точек для проведения сводных расчетов и квотирования выбросов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 174–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-174-189.

Scientific article

## **A METHODOLOGICAL APPROACH TO DETERMINING THE NUMBER AND LOCATION OF CONTROL POINTS FOR CONDUCTING SUMMARY CALCULATIONS AND EMISSION QUOTAS CALCULATION**

**Ovodkov Mikhail V.**

**Russian scientific research institute «Ecology», Moscow, Russia;**

**MIREA – Russian technological university (Lomonosov institute of fine chemical technologies), Moscow, Russia.**

**Petrov Vadim O.;**

**Tkachev Maxim A.;**

**✉ Azarov Valery N.**

**Russian scientific research institute «Ecology», Moscow, Russia**

**✉ [azarovpubl@mail.ru](mailto:azarovpubl@mail.ru)**

*Abstract.* The article describes the prerequisites for the development of a uniform methodological approach to determining control points for conducting summary calculations of atmospheric air pollution and further calculations of emission quotas. A flowchart of the methodology for determining the number and location of control points is presented, as well as the results of its application in the territories of 29 pilot cities participating in the federal Clean Air project and the experiment on emission quotas. Statistical methods of data processing are presented as ways to assess the representativeness of the number of control points. The results of the work carried out by the «Russian scientific research institute «Ecology» to identify control points in 29 pilot cities are presented. The directions of further development of the methodology are outlined, taking into account the functionality of network analysis methods and graph theory.

*Keywords:* atmospheric air, emissions, pollutants, control points, summary calculations of atmospheric pollution, emission quotas

**For citation:** Ovodkov M.V., Petrov V.O., Tkachev M.A., Azarov V.N. A methodological approach to determining the number and location of control points for conducting summary calculations and emission quotas calculation // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 4 (72). P. 174–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-174-189.

### **Введение**

Современный характер и масштабы загрязнения атмосферного воздуха требуют применения новых методов и технологий экологического моделирования, прогнозирования и оценок. Сводные расчеты (СР) загрязнения атмосферного воздуха являются эффективным современным инструментом управления качеством атмосферного воздуха на территориях промышленной и инфраструктурной активности. Федеральный проект «Чистый воздух» (ФПЧВ) и эксперимент по квотированию выбросов дали импульс к широкому практическому применению СР на территориях эксперимента. География эксперимента весьма широка, сегодня в его периметр включен 41 пилотный город России в связи с отмеченным в них высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферы.

Масштабная работа по подготовке СР, описанная в статье [1], выполнена силами Всероссийского научно-исследовательского института «Экология» (ФГБУ «ВНИИ Экология») по заданию Минприроды России и при поддержке проектного офиса ФПЧВ. В общей сложности в СР в рамках ФПЧВ включено порядка 7 тыс. объектов негативного воздействия на окружающую среду и более 107 тыс. источников выбросов.

СР представляют собой результаты моделирования полей приземных концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) от совокупности стационарных промышленных источников выбросов, автомобильного транспорта и автономных источников тепла частного сектора (АИТ),

расположенных на территории городов. Математической основой СР являются Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утвержденные приказом Минприроды России от 6 июня 2017 г. № 273 [2], которые опираются на теорию атмосферной диффузии, изложенную, в том числе, в работе [3].

Важнейшим этапом проведения СР и последующего квотирования выбросов является определение местоположения и количества контрольных точек (КТ). Важность этой задачи связана прежде всего с тем, что от местоположения и количества КТ, в конечном счете, зависят величины квот, являющихся обязательными к соблюдению нормативами выбросов.

В связи с изложенным перед исполнителем СР стоит задача, с одной стороны, обеспечить максимальный охват территории города КТ, с другой стороны – количество КТ должно быть оптимальным, чтобы не перегружать расчетно-аналитический аппарат квотирования и, как следствие, вычислительные мощности компьютеров.

Правила проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию, утвержденные приказом Минприроды России от 29 ноября 2019 г. № 813 [4] (Правила) устанавливают критерии КТ, однако не дают системного методического подхода к определению количества и местоположения КТ. При этом такой методический подход, по мнению авторов, необходим для единообразного и корректного квотирования. В связи с этим весьма актуальной является задача по разработке методики, позволяющей единообразно и системно определять количество и местоположение КТ независимо от субъективных факторов с учетом градостроительной обстановки, функционального зонирования, доминирующих типов источников выбросов и их пространственной локализации. Кроме того, такая методика должна быть максимально адаптирована к применяемым программно-аппаратным средствам проведения СР. В нашем случае необходимо было обеспечить сопряжение методики с функционалом унифицированной программы расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА) «Эколог-город» фирмы-разработчика «Интеграл», являющимся официальным программным продуктом в рамках эксперимента, принцип работы которого заключается в расчетном моделировании приземных концентраций ЗВ в узловых точках заданной пользователем расчетной сети.

### **Применение КТ в воздухоохранной деятельности**

КТ в воздухоохранной деятельности – это однозначно определенное, зафиксированное адресной и координатной привязкой место (точка) на территории города, в котором производится систематическое инструментальное или расчетное определение приземных концентраций ЗВ для контроля, нормирования либо квотирования выбросов.

Понятие КТ не теряет актуальности. С 90-х гг. прошлого века и до настоящего времени в проектах нормативов допустимых выбросов на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятия определяются КТ для проведения периодического инструментального контроля загрязнения атмосферы.

Сегодня к понятию КТ прибегают в следующих нормативно-методических документах: «Правила установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон», утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2018 г. № 222 [5], и «Требования к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий», утвержденные приказом Минприроды России от 28 ноября 2019 г. № 811 [6]. В данных документах КТ используются для систематических инструментальных замеров концентраций ЗВ инструментальными методами.

В рамках производственного экологического контроля (ПЭК) предприятие, кроме прочего, должно с заданной периодичностью контролировать концентрации ЗВ на границе СЗЗ в КТ. Посредством такого контроля экологическая служба предприятия подтверждает соблюдение утвержденных нормативов максимальных разовых предельно допустимых

выбросов на источниках выбросов. В данном случае уместно упомянуть проблему правоприменительной практики государственного экологического надзора, когда выявленное в ходе проверки превышение нормативов максимальных разовых предельно допустимых концентраций (ПДК) в КТ из проекта нормативов предельно допустимых выбросов по ЗВ, учтенному в проекте и разрешении на выброс, оспаривалось природопользователем ввиду неустраиваемых сомнений, так как вклад в данную КТ могли осуществлять и другие объекты (автодороги, АИТ, соседние предприятия), а не только проверяемое предприятие. Разбирательства по таким вопросам представлены, например, в решении Арбитражного суда Челябинской обл. по делу № А76-48561/2019 от 15 июля 2020 г. При этом СР, в отличие от методов инструментального контроля, позволяют оценить вклад каждого включенного в СР объекта и входящих в его состав источников выбросов в концентрации ЗВ в любой КТ.

Тематика КТ фигурирует и в ряде патентов воздухоохранной направленности. Например, патент [7] подробно описывает способ пространственной количественной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха методом расчетно-инструментального анализа, при котором применяется постановка КТ в узловых точках расчетной сети (РС). Данный патент направлен на определение корреляций между расчетными и измеренными концентрациями ЗВ.

Патент [8] описывает способ определения рациональной пространственной структуры размещения автоматических станций контроля загрязнения воздушного бассейна, входящей в качестве составной части в систему экологического мониторинга на территории города, и применяется для определения оптимального местоположения постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха (ПНЗ) на основании максимальных концентраций ЗВ в точках на территории города. Напрямую термин КТ в патенте не используется, однако дан подход к определению точек с максимальными концентрациями.

Способ формирования сети постов экологического мониторинга воздушной среды города, описанный в патенте [9], напрямую не затрагивает тематику КТ, но, как видится, может быть дополнен методом, описанным в патенте [10]. Сущность данного метода заключается в идентификации источника выброса ЗВ в атмосферу на базе технологии искусственного интеллекта, включающий непрерывный замер концентраций вредных веществ в атмосфере с помощью постов контроля в режиме реального времени, непрерывный замер влияющих на результат идентификации метеопараметров на метеостанциях в режиме реального времени.

Важность методов [9, 10] в контексте рассматриваемой темы состоит в том, что одна из задач КТ – обеспечить возможность для сопоставления СР с данными инструментального контроля. Важным следствием из вышесказанного является то, что количество и местоположение КТ определяется, в том числе, возможностью проведения в данных точках систематических инструментальных измерений. Одновременно расчетные методы определения КТ на основе СР могут и должны использоваться для определения и корректировки местоположения и количества ПНЗ и малогабаритных сигнальных датчиков контроля загрязнения атмосферы.

С развитием направления расчетного моделирования зон загрязнения атмосферы КТ закрепились в тематике СР и квотирования. Несмотря на отсутствие в Правилах специального определения КТ, такое определение можно сформулировать. КТ для проведения СР – это совокупность однозначно определенных точек на территории проведения СР, в которых расчетным методом определяются значения приземных концентраций ЗВ, количество и местоположение которых определяется в соответствии с утвержденными Правилами критериями, а также в соответствии с необходимостью формирования оптимальной представительной выборки точек, характеризующей максимальные концентрации ЗВ на территории и вклады в концентрации от наибольшего количества включенных в СР объектов негативного воздействия на окружающую среду и их источников.

## **Критерии определения КТ для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы**

Пунктом 37 раздела VII Правил установлены следующие критерии определения КТ для проведения СР:

1. КТ должны располагаться в центральной части города, в жилых районах, где уровни расчетных концентраций ЗВ превышают 0,5 ПДК, на границах СЗЗ крупных объектов, оказывающий негативное воздействие (ОНВ) на окружающую среду, жилых зон, примыкающих к автомобильным дорогам с интенсивным движением, на территориях размещения детских учреждений и в зонах с особыми условиями.

2. КТ должны располагаться в местах расположения ПНЗ для уточнения результатов СР по данным государственного мониторинга атмосферного воздуха.

3. Количество и расположение КТ должны обеспечивать получение расчетным путем репрезентативной информации об источниках выбросов, дающих наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха на территории проведения СР.

По первому пункту критериев можно отметить, что указанные зоны и точки относятся к нормируемым территориям в части качества атмосферы. Также в соответствии с п. 2.2 СанПиН 2.1.6.1032–01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест» (документ утратил силу) к зонам с особыми условиями относятся территории размещения лечебно-профилактических учреждений длительного пребывания больных и центров реабилитации, места массового отдыха населения (дачные и садово-огородные участки, парки, спортивные базы и их сооружения на открытом воздухе) [11]. Очевидно, что критерии, предусмотренные первым пунктом, допускают формирование различных наборов КТ для одного и того же города. Второй критерий вполне однозначный, так как к КТ относятся все действующие ПНЗ города. По третьему критерию следует констатировать, что понятие репрезентативности весьма субъективно и каждым исполнителем может быть интерпретировано по-своему.

В связи с изложенным в интересах СР и сопутствующей аналитики можно предложить классификацию КТ по четырем категориям:

1. КТ в жилой зоне (ЖЗ), то есть в территориальной зоне в населенном пункте, на которой в соответствии с законодательством должны соблюдаться гигиенические нормативы 1,0 ПДК.

2. КТ на территории с особыми требованиями к качеству атмосферного воздуха (ТОТКАВ). Это территории, выделенные в документах градостроительного зонирования, решениях органов местного самоуправления для организации курортных зон, размещения санаториев, домов отдыха, пансионатов, туристских баз, организованного отдыха населения, в том числе пляжей, парков, спортивных баз и их сооружений на открытом воздухе, а также на территориях размещения лечебно-профилактических учреждений длительного пребывания больных и центров реабилитации, на которых в соответствии с законодательством не допускается превышение гигиенических нормативов содержания ЗВ в атмосферном воздухе 0,8 ПДК (ОБУВ).

3. КТ на границе СЗЗ.

4. КТ в местах расположения ПНЗ.

Результаты анализа КТ по данным четырем категориям представлены в разделе «Результаты применения методики».

## Методика определения местоположения и количества КТ для проведения СР загрязнения атмосферы

В наиболее общем виде предлагаемая методика заключается в охвате территории города регулярной прямоугольной расчетной сетью (РС) заданной густоты с последующим уточнением конфигурации зон превышения нормативов ПДК и выделением в узловых точках РС точек, соответствующих критериям п. 37 раздела VII Правил, с последующим исключением избыточных точек. Такой подход позволяет определить КТ с учетом их максимальной репрезентативности.

Каждый пилотный город, включенный в эксперимент, имеет определенную планировочную структуру, обусловленную историей его появления и развития. Принято выделять четыре типа планировочной структуры городов [12]:

- радиально-концентрическая;
- линейная;
- решетчато-сетевая;
- лучевая (веерная).

В соответствии с СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» [13] по численности населения города в нашей стране подразделяются на:

- малые – до 50 тыс. чел. (в эту группу включаются и поселки городского типа);
- средние – от 50 до 100 тыс. чел.;
- большие – от 100 до 250 тыс. чел.;
- крупные – от 250 до 1 млн чел.;
- крупнейшие – свыше 1 млн чел.

Универсальность заложенных в методику подходов позволяет применять ее к городам с различной планировочной структурой, площадью и численностью населения.

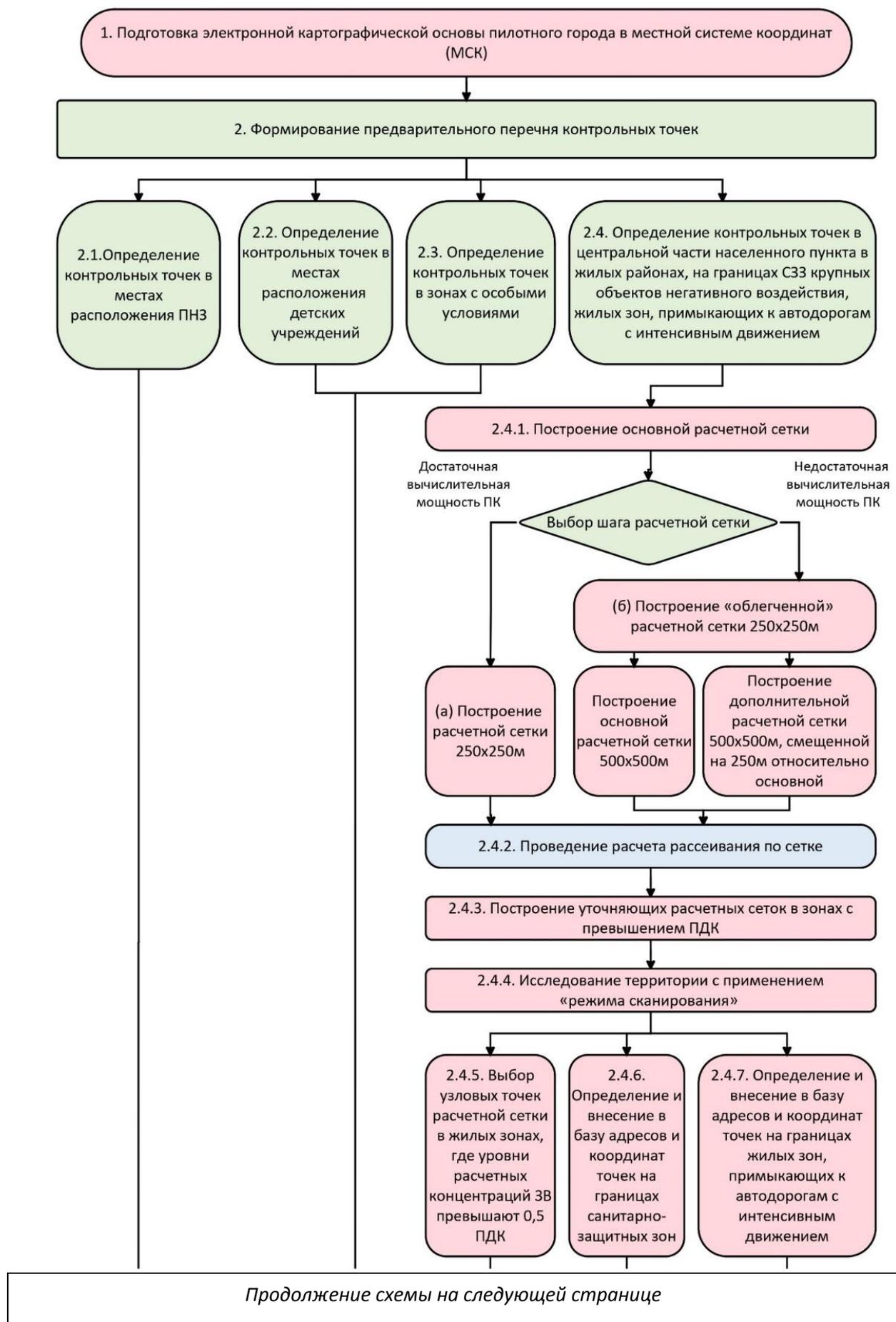
Так как основным инструментом для проведения СР является программный комплекс УПРЗА «Эколог-город», реализующий технологию моделирования приземных концентраций ЗВ в узловых точках РС с заданным шагом ячейки, то и предложенная авторами методика также основана на использовании РС. Преимуществом такого подхода помимо его формализованности является возможность применения методов сетевого геопространственного анализа данных о концентрациях ЗВ, в том числе основанных на методах, описанных в публикациях [14–17].

В виде блок-схемы методика представлена на рис. 1.

Как видно на схеме, отправной точкой методики является подготовка адаптированной электронной картографической основы. Для этих целей авторами используется полученная в Росреестре официальная электронная послойная векторная карта городов в системе координат МСК.

Далее проводится формирование перечня КТ. Для этого требуется установить КТ в местах расположения ПНЗ, детских учреждений и зон с особыми условиями (критерии 1 и 2 из раздела 2 статьи).

Основой для дальнейшего определения КТ является построение РС. Так, для выбора КТ в центральной части населенного пункта, в жилых районах, где уровни расчетных концентраций ЗВ превышают 0,5 ПДК, на границах СЗЗ крупных объектов негативного воздействия на окружающую среду, жилых зон, примыкающих к автодорогам с интенсивным движением (критерий 1 из раздела 2 статьи), строится базовая прямоугольная регулярная РС шагом 250x250 м, покрывающая территорию города. Такой шаг РС, как было установлено в ходе экспериментальных расчетов, является оптимальным как в части вычислительной нагрузки, так и в части корректности оценки рассеивания твердых и газообразных ЗВ в городе. Одновременно такой шаг РС соответствует требованиям абзаца 2 п. 37 Правил.



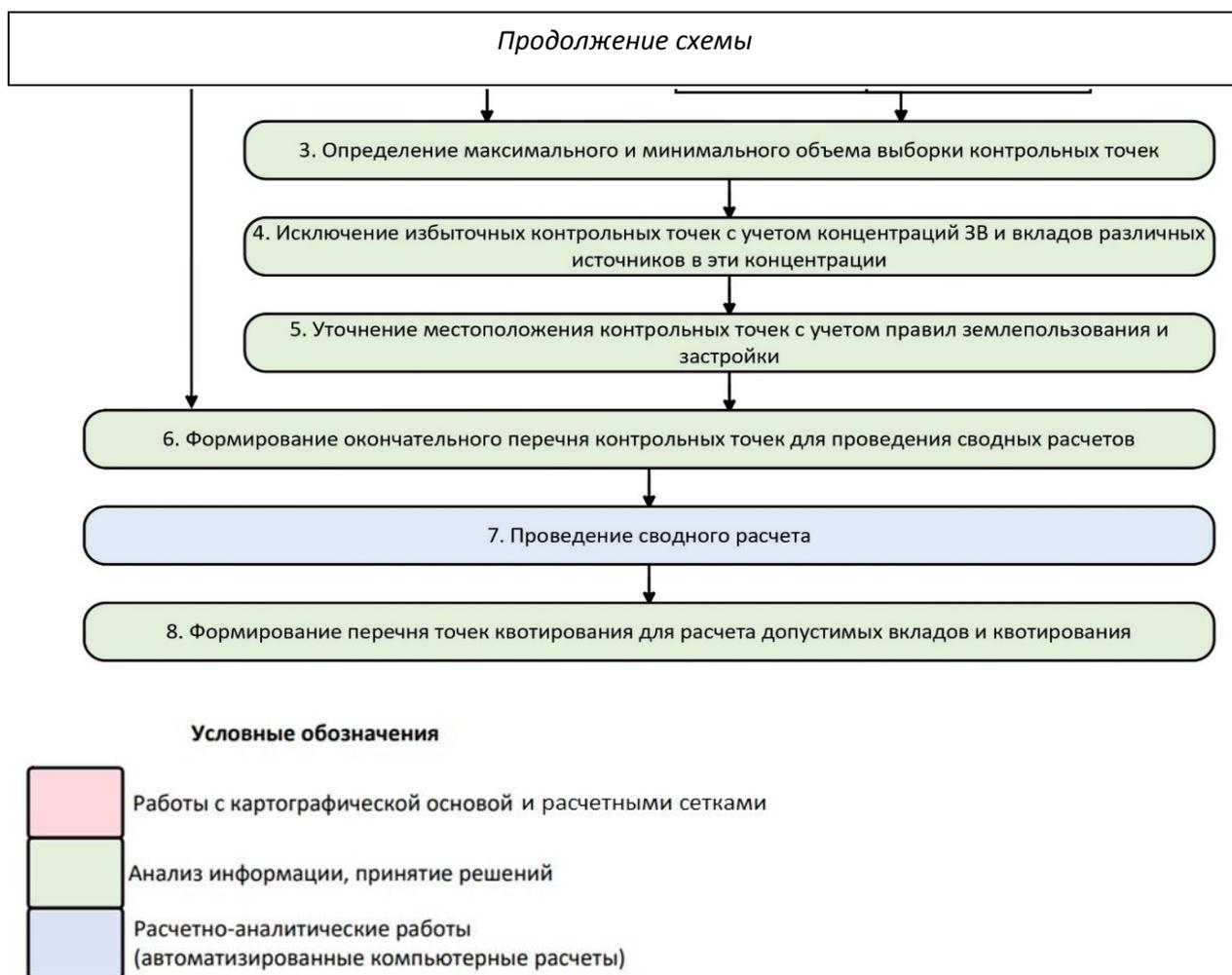


Рис. 1. Методика определения КТ

В качестве точки привязки для построения базовой РС выбирается геометрический центр города, определить который можно с помощью функционала ГИС-программ, например QGIS.

На практике расчет концентраций в КТ по отдельным городам проводился на стандартном персональном компьютере и занял порядка двух суток, в связи с чем был поставлен вопрос о применении в будущем суперкомпьютера для таких работ. В связи с этим в случае ограниченных вычислительных ресурсов следует использовать вместо одной базовой РС двух РС 500x500 м, наложенных друг на друга со смещением 250 м одновременно по осям X и Y соответственно.

Результатом применения базовой РС являются поля рассеивания концентраций ЗВ (зоны загрязнения), на основании которых в тех узлах базовой РС, которые попадают в границы территорий, указанных в критерии 1, и в которых наблюдается повышенная концентрация ЗВ (то есть выше 0,5 ПДК), устанавливаются КТ.

Далее зоны с видимым превышениями ПДК дополнительно охватываются более густыми, но меньшими в части охвата территории уточняющими РС с шагом 50x50 м для детализации информации о конфигурации зон превышения нормативов ПДК и выявления максимумов концентраций для установления КТ с учетом выявленных максимумов.

На рис. 2 показан результат применения уточняющей РС.

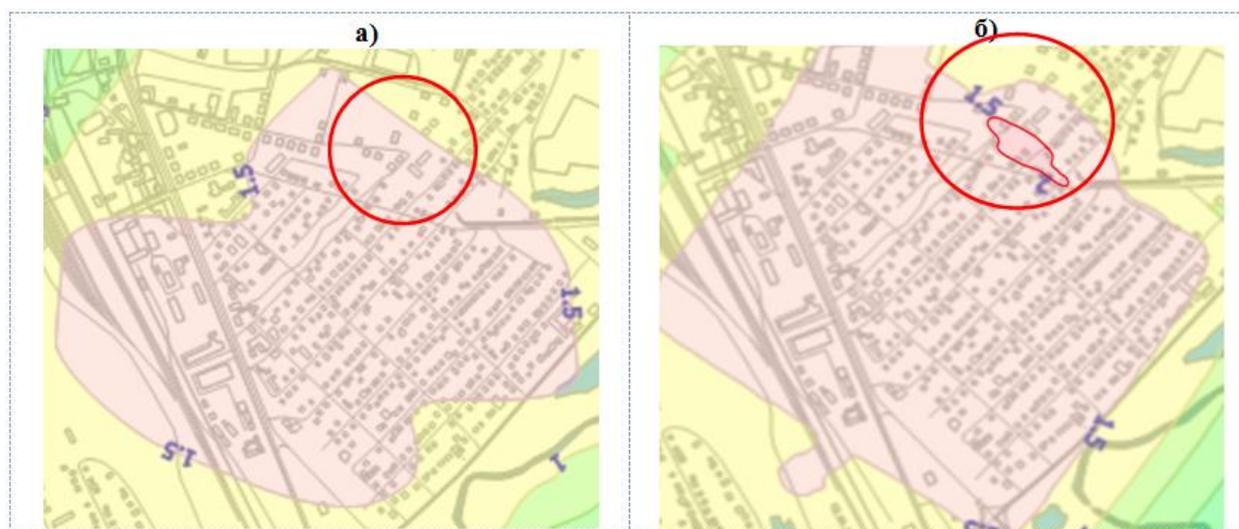


Рис. 2. а – концентрации ЗВ без использования уточняющей РС;  
б – результаты сканирования территории с использованием уточняющей РС

На рис. 2 видно, что при использовании уточняющей РС 50x50 м (б) появляется новая зона 2 ПДК, которая не обнаружена при использовании РС 250x250м (а).

Результатом применения уточняющих РС являются дополнительные КТ с превышениями нормативов ПДК.

Далее пространственное распределение концентраций ЗВ дополнительно анализируется с применением функционала программы УПРЗА по экспресс-определению (сканированию) концентраций. Особое внимание уделяется территориям, прилегающим к объектам промышленности, энергетики и в частном секторе с угольным отоплением. При этом следует понимать, что в режиме сканирования программой УПРЗА применяется метод интерполяции, то есть определение концентраций без полноценного расчета.

Результатом применения режима сканирования является дополнительная проверка правильности расстановки КТ в части учета всех зон с превышениями ПДК.

Таким образом, по результатам выполнения перечисленных выше этапов формируется генеральная совокупность КТ. Однако поскольку количество КТ должно быть оптимальным, но при этом необходимо обеспечивать репрезентативную информацию как о загрязнении атмосферы, так и о вкладах основных источников, то имеется необходимость обеспечения такой репрезентативности. Для решения данного вопроса были применены нижеследующие статистические методы анализа.

Посредством метода определения достоверного объема выборки [12] устанавливается минимальное необходимое количество контрольных точек  $n$  для обеспечения репрезентативности. Необходимое число контрольных точек при известном объеме генеральной совокупности  $N$  (генеральная совокупность – все КТ) в случае бесповторной выборки рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{t^2 \times \sigma^2 \times N}{\Delta_{\text{доп}}^2 \times N + t^2 \times \sigma^2},$$

где  $N$  – генеральная совокупность КТ;  $t$  – коэффициент доверия, определяемый по работе [12];  $\sigma^2$  – дисперсия, которая находится из следующего соотношения:

$$\sigma^2 = \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}}{6},$$

где  $C_{max}$ ,  $C_{min}$  – соответственно максимальное и минимальное значение концентрации загрязняющего вещества в КТ, доли ПДК;  $\Delta$  – относительная ошибка выборки;

$$\Delta = \frac{C_{ср.ген.} - C_{ср.выб.}}{C_{ср.выб.}},$$

где  $C_{ср.ген.}$ ,  $C_{ср.выб.}$  – средняя концентрация генеральной и выборочной совокупностей соответственно, доли ПДК;

$$\Delta_{абс.} = C_{ср.ген.} - C_{ср.выб.},$$

где  $\Delta_{абс.}$  – абсолютная ошибка выборки.

Таким образом, зная количество КТ, входящих в генеральную совокупность, и концентрации ЗВ в этих точках, можно определить минимальное количество КТ для рассматриваемой территории –  $n$ , обеспечивающее репрезентативность.

Для определения максимума КТ использован метод В.И. Паниотто [18]. Данный метод устанавливает соответствие между объемом генеральной совокупности КТ  $N$  и достоверным объемом выборки КТ  $n$  при уровне значимости  $\alpha=0,05$ . Данный метод предназначен для определения объема выборки для больших генеральных совокупностей. При использовании данного метода можно определить максимальное количество КТ для рассматриваемой территории на основании объема генеральной совокупности точек. Максимальное количество КТ в зависимости от объема генеральной совокупности представлено в табл. 1.

Таблица 1

#### Определение объема выборки по методу В.И. Паниотто [18]

Объем генеральной совокупности	500	1000	2000	3000	4000	5000	10000	100000	$\infty$
Объем выборки	222	286	333	350	360	370	385	398	400

После определения необходимого количества КТ производится исключение избыточных КТ. Выбор избыточных КТ осуществляется по следующему принципу. Производится анализ количества ЗВ, концентрация которых превышает ПДК. Затем производится анализ вкладов от источников загрязнения атмосферного воздуха по рассматриваемому ЗВ в данной КТ. Если вклад в концентрации ЗВ дают одинаковые источники, то выбирается точка с наибольшей концентрацией ЗВ, а прочие КТ считаются избыточными и подлежат исключению.

При выявлении нескольких КТ с равными значениями концентраций по рассматриваемому ЗВ КТ выбирается исходя из максимального значения по другому ЗВ.

Результатом вышеперечисленных этапов является окончательный перечень КТ для расчетов допустимых вкладов в концентрации ЗВ для квотирования выбросов. Этот набор КТ является конечным результатом применения Методики определения количества и местоположения контрольных точек и согласно п. 56 (е) раздела IX Правил вносятся в заключение о проведении СР.

#### Результаты применения методики

Методика была применена при проведении СР в 29 городах – участниках эксперимента по квотированию. В табл. 2 представлены характеристики пилотных городов, итоговое общее количество КТ и в разрезе типов, а также результаты анализа репрезентативности.

Таблица 2

## Типы КТ в пилотных городах и оценка достоверности выборки КТ

Город	Площадь, км <sup>2</sup>	Численность населения	ПНЗ	ТОТКАВ	ЖЗ*	Всего КТ	N**	n***
Новочеркасск	127,84	160 782	3	9	42	54	848	28
Гусиноозерск	252	24 504	1	17	30	48	306	28
Селенгинск	378,16	13 187	2	3	14	19	117	20
Кемерово	282,3	549 362	8	18	38	64	2 560	50
Искитим	62,2	56 781	3	18	51	72	554	26
Курган	393,03	305 505	5	5	53	63	1 922	12
Лесосибирск	270,83	59 207	2	1	51	54	540	20
Минусинск	60,5	71 792	1	11	63	75	985	65
Усолье-Сибирское	74	73 507	2	14	43	59	1 030	58
Чегдомын	20,9	12 672	1	0	16	17	230	21
Черногорск	117,9	77 875	1	17	89	107	800	30
Южно-Сахалинск	236,2	187 359	4	51	120	175	1 500	21
Ангарск	209	230 058	5	34	48	87	3 001	55
Астрахань	208,69	468 842	5	24	92	121	3 100	53
Барнаул	322	690 128	5	17	88	110	3 989	68
Абакан	112,38	185 348	2	55	66	123	1 400	85
Зима	52,85	30 181	2	1	35	38	420	30
Свирск	38,62	15 333	1	10	11	22	250	20
Черемхово	113,99	53 415	4	6	64	74	901	50
Шелехов	31	41 184	2	16	20	38	290	18
Кызыл	97,41	128 149	3	10	61	74	2 000	40
Усурийск	173	205 343	1	14	60	75	1 500	73
Ачинск	103	101 384	3	5	58	66	2 600	32
Комсомольск-на-Амуре	325,1	236 158	4	2	104	110	2133	27
Петровск-Забайкальский	300	14 683	1	6	43	50	490	15
Ростов-на-Дону	348,5	1 135 968	7	41	213	261	2 600	222
Улан-Удэ	365,71	436 138	4	8	104	116	1 723	101
Иркутск	279,98	611 215	7	12	93	112	2 500	35
Махачкала	468,23	759 521	3	10	33	46	1 300	33

Примечание: \*КТ на границе СЗЗ учтены в данном столбце; \*\*генеральная совокупность КТ; \*\*\*минимальное необходимое количество КТ

Как видно из табл. 2, количество КТ и их распределение по типам уникальны для каждого города, при этом достаточность выбранного для 29 городов количества КТ в целом подтверждается статистическим методом определения достоверного объема выборки.

На рис. 3 показаны примеры графического отображения КТ на картографической основе.



Рис. 3. Примеры расположения КТ в городах: а – Лесосибирск; б – Барнаул

На рис. 3 видно, что КТ равномерно распределены по территории пилотных городов и при этом учитывают особенности расположения нормируемых территорий и источников выбросов ЗВ.

### Перспективы развития методики

Загрязнение атмосферы города следует рассматривать как сложную систему, на формирование которой оказывает влияние целый ряд техногенных и природных факторов. В последние годы для изучения сложных систем достаточно широко используются методы сетевого анализа [14–17]. В нашем случае КТ можно представить как узлы сети, между которыми реализуются определенные связи. По числу связей можно установить закон распределения узлов и тем самым, например, определить необходимое число контрольных точек для формирования репрезентативной выборки [14].

В современной теории сетей существует понятие важности узла или связи (centrality), число связей узла называется степенью (degree). Простейшей количественной мерой важности узла, обозначаемой degree centrality, может служить степень узла, то есть число связей, которые принадлежат данному узлу [14].

Другой мерой важности является загрузка (betweenness centrality)  $B_i$ , которая определяется как доля суммарного числа кратчайших путей между всеми узлами, которые проходят через узел к общему числу кратчайших путей сети. Узлы с высоким значением  $B$  являются наиболее загруженными.

Показатель  $B_i$ , определяющий степень загруженности узла, определяется по формуле:

$$B_i = \frac{\sum \sigma_i}{\sigma_n},$$

где  $\sigma_i$  – число кратчайших путей из узла  $s$  в узел  $t$  через узел  $i$ ;  $\sigma_n$  – общее число кратчайших связей между всеми парами  $s$  и  $t$ .

Расчет кратчайшего расстояния является стандартной задачей для ГИС.

Таким образом, выбрав узлы с максимальным значением  $V_i$ , можно сформировать репрезентативную выборку контрольных точек.

Еще одним показателем важности узла может служить показатель closeness centrality,  $C_i$ , характеризующий среднюю близость к данному узлу всех остальных узлов сети.

$$C_i = \frac{N}{\sum_j d_{ij}},$$

где  $N$  – общее число узлов;  $d_{ij}$  – число связей по кратчайшему маршруту  $i$  и  $j$ .

Существуют и другие меры важности узлов, в том числе разработанные специально для конкретных сетевых структур. Установлено, что во многих реальных сетях небольшое количество узлов содержит большое количество связей и, наоборот, много узлов содержит небольшое количество связей [14, 15]. Следовательно, при формировании репрезентативной выборки КТ необходимо учитывать узлы с большим количеством связей, поскольку их удаление может разрушить сеть. Как видится, исследования в данной части должны быть продолжены, в том числе с применением функционала нейросетей [15].

### Заключение

Универсальность подходов, примененных в предложенной методике, и ее сопряжение с алгоритмами работы программного комплекса УПРЗА «Эколог-город» позволили при подготовке СР по 29 новым пилотным городам определить оптимальное количество и местоположение КТ с учетом планировочной структуры этих городов, климатическими и ландшафтными характеристиками, а также различными особенностями взаиморасположения производственных, инфраструктурных и социальных объектов. По результатам применения методики обеспечена возможность реализации дальнейших этапов эксперимента по квотированию применительно к 29 новым городам – формирование перечней квотируемых объектов, определение допустимых вкладов в концентрации в КТ, утверждение квот.

Определение на территории города КТ, способных наиболее корректно охарактеризовать как состояние атмосферного воздуха, так и вклады в это загрязнение отдельных источников выбросов, была и остается весьма актуальной воздухоохранной задачей, в связи с чем, по мнению авторов, тематика КТ имеет большой научно-методический потенциал. Представляется, что исследования в направлении оценки количества, местоположения и репрезентативности КТ должны быть продолжены и синхронизированы с развитием систем автоматического контроля выбросов на источниках, сетями малогабаритных сигнальных датчиков контроля загрязнения атмосферы, системами гибридного экологического мониторинга. Кроме того, в работе с КТ имеется потенциал для применения современных методов сетевого анализа, которые все шире используются для работы с геопространственными данными.

Весьма важной прикладной задачей является автоматизация определения КТ. Наиболее предпочтительным видится встраивание соответствующего модуля в существующие программные продукты для проведения СР.

Оводковым М.В., являющимся доцентом кафедры экологической и промышленной безопасности Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова Российского технологического университета МИРЭА, настоящая методика включена в учебный процесс при проведении лекционных и практических занятий.

### Список источников

1. Оводков М.В. О подготовке ФГБУ «ВНИИ Экология» сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха в рамках федерального проекта «Чистый воздух» и эксперимента по квотированию выбросов. Методология. Модель. Аналитика // Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2024. Т. 5. № 1. С. 20–32.

2. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: приказ Минприроды России от 6 июня 2017 г. № 273. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».
3. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
4. Об утверждении правил проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию: приказ Минприроды России от 29 нояб. 2019 г. № 813. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».
5. Об утверждении Правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон: постановление Правительства Рос. Федерации от 3 марта 2018 г. № 222. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».
6. Об утверждении требований к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий: приказ Минприроды России от 28 нояб. 2019 г. № 811 // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: [docs.cntd.ru>document/564062418](https://docs.cntd.ru/document/564062418) (дата обращения: 18.06.2024).
7. Способ пространственной количественной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха: пат. № 2503042 Рос. Федерация, МПК G01W 1/00(2006.01). № 2012136028/28 / Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Вековшина С.А., Чигвинцев В.М.; заявл. 21.08.2012; опубл. 27.12.2013.
8. Способ формирования сети наблюдений для контроля загрязнения атмосферы города: пат. № 2102782 Рос. Федерация, МПК G01W 1/00 (2006.01). № 94004144/28 / Земсков В.С., Киселев В.И., Колодий В.П., Эфендиев С.М.; заявл. 08.02.1994; опубл. 20.01.1998.
9. Способ формирования сети постов экологического мониторинга воздушной среды города: пат. № 2597671 Рос. Федерация, МПК G01W 1/00 (2006.01). № 2015110798/28 / Крупина Н.Н., Киприянова Е.Н.; заявл. 25.03.2015; опубл. 20.09.2016.
10. Способ идентификации источника выброса вредных веществ в атмосферу на базе технологии искусственного интеллекта: пат. № 2818685 Рос. Федерация, МПК G01W1/00 (2006.01), G06N3/00 (2006.01). № 2023116022 / Кычкин А.В.; заявл. 2023-06-19; опубл. 2024-05-03.
11. СанПиН 2.1.6.1032–01. Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест: постановление от 17 мая 2001 г. № 14 // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: [docs.cntd.ru>document/901787814](https://docs.cntd.ru/document/901787814) (дата обращения: 18.06.2024).
12. Бочаров Ю.П., Кудрявцев О.К. Планировочная структура современного города. М.: Стройиздат, 1972. 160 с.
13. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 442.07.01–89 // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: [docs.cntd.ru>document/456054209](https://docs.cntd.ru/document/456054209) (дата обращения: 18.06.2024).
14. Евин И.А. Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 2. С. 121–141.
15. Мешалкин В.П., Панарин В.М., Маслова А.А. Нейронные сети в автоматизированной системе мониторинга состояния окружающей среды // Sciences of Europe. 2020. № 50-2 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyronnye-seti-v-avtomatizirovannoy-sisteme-monitoringa-sostoyaniya-okruzhayushey-sredy> (дата обращения: 12.09.2024).
16. Methods for multilevel analysis and visualization of geographical networks / eds. by C. Rozenblat, G. Melancon. 2013. 223 p.
17. Barthelemy M. Spatial networks, 2022. 443 p. DOI: 10.1007/978-3-030-94106-25.

18. Матвеев В.А. Статистика: учеб.-метод. пособие. Н. Новгород: Нижегородский гос. ун-т, 2015. 84 с.

19. Оводков М.В., Баранникова С.И., Азаров В.Н. Актуализация сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 211–223. EDN IFLECB.

### References

1. Ovodkov M.V. O podgotovke FGBU «VNII Ekologiya» svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfornogo vozduha v ramkah federal'nogo proekta «Chistyj vozduh» i eksperimenta po kvotirovaniyu vybrosov. Metodologiya. Model'. Analitika // Ohrana okruzhayushchej sredy i zapovednoe delo. 2024. T. 5. № 1. S. 20–32.

2. Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseivaniya vybrosov vrednyh (zagryaznyayushchih) veshchestv v atmosfornom vozduhe: prikaz Minprirody Rossii ot 6 iyunya 2017 g. № 273. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».

3. Berlyand M.E. Sovremennye problemy atmosfornoj diffuzii i zagryazneniya atmosfery. L., Gidrometeoizdat, 1975. 448 s.

4. Ob utverzhdenii pravil provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfornogo vozduha, vkluchaya ih aktualizaciyu: prikaz Minprirody Rossii ot 29 noyab. 2019 g. № 813. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».

5. Ob utverzhdenii Pravil ustanovleniya sanitarno-zashchitnyh zon i ispol'zovaniya zemel'nyh uchastkov, raspolozhennyh v granichah sanitarno-zashchitnyh zon: postanovlenie Pravitel'stva Ros. Federacii ot 3 marta 2018 g. № 222. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».

6. Ob utverzhdenii trebovanij k meropriyatijam po umen'sheniyu vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozduh v periody neblagopriyatnyh meteorologicheskikh uslovij: prikaz Minprirody Rossii ot 28 noyab. 2019 g. № 811 // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru>document/564062418 (data obrashcheniya: 18.06.2024).

7. Sposob prostranstvennoj kolichestvennoj ocenki urovnya zagryazneniya atmosfornogo vozduha: pat. № 2503042 Ros. Federaciya, MPK G01W 1/00(2006.01). № 2012136028/28 / Zajceva N.V., Maj I.V., Klejn S.V., Vekovshinina S.A., Chigvincev V.M.; zayavl. 21.08.2012; opubl. 27.12.2013.

8. Sposob formirovaniya seti nablyudenij dlya kontrolya zagryazneniya atmosfery goroda: pat. № 2102782 Ros. Federaciya, MPK G01W 1/00 (2006.01). № 94004144/28 / Zemskov V.S., Kiselev V.I., Kolodij V.P., Efendiev S.M.; zayavl. 08.02.1994; opubl. 20.01.1998.

9. Sposob formirovaniya seti postov ekologicheskogo monitoringa vozduhnoj sredy goroda: pat. № 2597671 Ros. Federaciya, MPK G01W 1/00 (2006.01). № 2015110798/28 / Krupina N.N., Kipriyanova E.N.; zayavl. 25.03.2015; opubl. 20.09.2016.

10. Sposob identifikacii istochnika vybrosa vrednyh veshchestv v atmosferu na baze tekhnologii iskusstvennogo intellekta: pat. № 2818685 Ros. Federaciya, MPK G01W1/00 (2006.01), G06N3/00 (2006.01). № 2023116022 / Kychkin A.V.; zayavl. 2023-06-19; opubl. 2024-05-03.

11. SanPiN 2.1.6.1032–01. Gigienicheskie trebovaniya k obespecheniyu kachestva atmosfornogo vozduha naselennyh mest: postanovlenie ot 17 maya 2001 g. № 14 // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru>document/901787814 (data obrashcheniya: 18.06.2024).

12. Bocharov Yu.P., Kudryavcev O.K. Planirovochnaya struktura sovremennogo goroda. M.: Strojizdat, 1972. 160 s.

13. SP 42.13330.2016. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskih i sel'skih poselenij. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 442.07.01-89 // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii. URL: docs.cntd.ru>document/456054209 (data obrashcheniya: 18.06.2024).

14. Evin I.A. Vvedenie v teoriyu slozhnyh setej // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. 2010. T. 2. № 2. С. 121–141.
15. Meshalkin V.P., Panarin V.M., Maslova A.A. Neironnye seti v avtomatizirovannoy sisteme monitoringa sostoyaniya okruzhayushchej sredy // Sciences of Europe. 2020. № 50-2 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyronnye-seti-v-avtomatizirovannoy-sisteme-monitoringa-sostoyaniya-okruzhayushchej-sredy> (data obrashcheniya: 12.09.2024).
16. Methods for multilevel analysis and visualization of geographical networks / eds. By C. Rozenblat, G. Melancon. 2013. 223 p.
17. Barthelemy M. Spatial networks, 2022. 443 p. DOI: 10.1007/978-3-030-94106-25.
18. Matveev V.A. Statistika: ucheb.-metod. posobie. N. Novgorod: Nizhegorodskij gos. un-t, 2015. 84 s.
19. Ovodkov M.V., Barannikova S.I., Azarov V.N. Aktualizaciya svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfernogo vozduha // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Stroitel'stvo i arhitektura. 2023. № 1 (90). S. 211–223. EDN IFLECB.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 10.10.2024; одобрена после рецензирования: 31.10.2024; принята к публикации: 11.11.2024

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 10.10.2024; approved after review: 31.10.2024; accepted for publication: 11.11.2024

*Информация об авторах:*

**Оводков Михаил Владимирович**, руководитель научно-методического центра экологического моделирования, прогнозирования и оценок ФГБУ «ВНИИ Экология» (117628, Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4); доцент кафедры экологической и промышленной безопасности Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), кандидат технических наук, e-mail: [m.ovodkov@vniiecolology.ru](mailto:m.ovodkov@vniiecolology.ru), <https://orcid.org/0009-0003-4036-102X>, SPIN-код: 5548-3499

**Петров Вадим Олегович**, заместитель директора ФГБУ «ВНИИ Экология» (117628, Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4), e-mail: [v.petrov@vniiecolology.ru](mailto:v.petrov@vniiecolology.ru), <https://orcid.org/0009-0002-2392-2879>, SPIN-код: 9030-4439

**Ткачев Максим Александрович**, инженер по мониторингу ФГБУ «ВНИИ Экология» (117628, Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4), e-mail: [m.tkachev@vniiecolology.ru](mailto:m.tkachev@vniiecolology.ru), <https://orcid.org/0009-0002-5650-3726>, SPIN-код: 9830-3310

**Азаров Валерий Николаевич**, ведущий специалист ФГБУ «ВНИИ Экология» (117628, Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4), доктор технических наук, профессор, e-mail: [azarovpubl@mail.ru](mailto:azarovpubl@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0944-0232>, SPIN-код: 9887-0836

*Information about the authors:*

**Ovodkov Mikhail V.**, head of the scientific and methodological center for environmental modeling of the FSBI «VNIIE Ecology» (117628, Moscow, 36 km MKAD, dvld. 1, b. 4); associate professor of the department of environmental and industrial safety at the M.V. Lomonosov institute of fine chemical technologies of the MIREA – Russian university of technology (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), candidate of technical sciences, e-mail: [m.ovodkov@vniiecolology.ru](mailto:m.ovodkov@vniiecolology.ru), <https://orcid.org/0009-0003-4036-102X>, SPIN: 5548-3499

**Petrov Vadim O.**, deputy director of the FSBI «VNIIE Ecology» (117628, Moscow, 36 km MKAD, dvld. 1, b. 4), e-mail: [v.petrov@vniiecolology.ru](mailto:v.petrov@vniiecolology.ru), <https://orcid.org/0009-0002-2392-2879>, SPIN: 9030-4439

**Tkachev Maxim A.**, monitoring engineer of the FSBI «VNIIE Ecology» (117628, Moscow, 36 km MKAD, dvld. 1, b. 4), e-mail: [m.tkachev@vniiecolology.ru](mailto:m.tkachev@vniiecolology.ru), <https://orcid.org/0009-0002-5650-3726>, SPIN: 9830-3310

**Azarov Valery N.**, leading specialist of the FSBI «VNIIE Ecology» (117628, Moscow, 36 km MKAD, dvld. 1, b. 4), doctor of technical sciences, professor, e-mail: [azarovpubl@mail.ru](mailto:azarovpubl@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0944-0232>, SPIN: 9887-0836